

# CAE応力解析による脚物家具の構造強度評価方法(第1報)

## —CAE応力解析のための木材材料特性の設定—

楠本 幸裕\*1 竹内 和敏\*1

### Development of Structure Analysis Method of Legged Furniture by CAE Stress Analysis

#### - Assignment of Wooden Material Properties for CAE Stress Analysis -

Yukihiro Kusumoto and Kazutoshi Takeuchi

脚物家具の設計において、強度面を重視し、既存商品をベースにした予測と経験に基づいた設計の場合、デザイン性に劣る。逆にデザイン性を重視した過去に実例のない形状の場合、強度を確認するための試作と強度試験の必要があり、手間や費用が掛かる上に、強度不足の場合、再び設計・試作・試験が必要となる。そのため設計段階で、ある程度の構造強度を評価できる手法が求められている。そこで本研究では、CAE解析ソフトを用いた応力解析による、脚物家具の構造強度の評価方法を開発する。なお本研究の目的は、限界の荷重値の推定ではなく、設計した形状に対し強度試験を行った場合に、どの部位に応力が加わりやすいのかを示し、デザイン修正の指標とすることである。1年目である本年はまず、CAE応力解析で使用する木材の材料特性の設定を行った。

#### 1 はじめに

脚物家具を設計する際、強度面を考慮し、過去の経験から「これだけあれば十分」と言う予測に基づく設計や、既存商品から強度を落とさない程度に変更を加えるなど、経験や勘に頼ることが多く、デザイン性に優れたスタイリッシュな家具を設計し難い。

一方でデザイン性を重視し、過去に実例のない思い切った形状に設計した場合、それが十分な強度を有しているかは、試作して強度試験を実施し確認する必要があるため、手間や時間、費用が掛かるだけでなく、試験の結果、強度不足が判明した場合は再度、設計・試作・試験のプロセスが必要となる。

そのため設計の段階である程度その構造の強度の評価（応力が加わりやすい／変形を起こしやすい部位の推定）ができる手法が求められている。

そこで本研究では、実際に家具を製作して強度試験を行わずとも、設計の段階である程度の構造強度を評価できる手法を開発する。具体的には、対象とする脚物家具の3次元CADモデルを対象に、CAE解析ソフトを用いて有限要素法による応力解析を行い、JIS規格の強度試験を行った際に発生する応力や変形の分布、およびその度合いのシミュレーションを可能にする。得られた結果により、十分な構造強度を有し、かつスタ

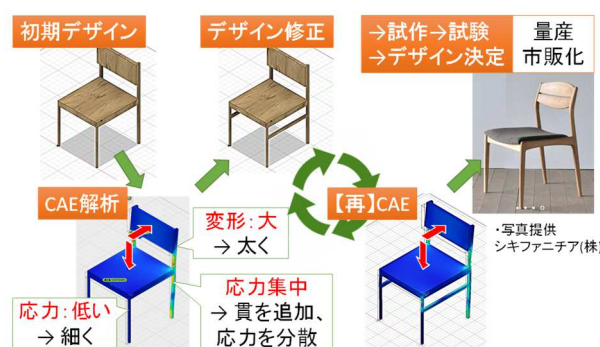


図1 CAE応力解析によるデザイン修正イメージ

イリッシュな脚物家具の設計が可能になる（図1）。

なおこのような手法は、機械金属や建築業界においては既に実用化が進んでいる。しかし家具業界（木製家具）においては「木材の異方性や非線形性を考慮した解析」や「ホゾやダボ等の接合手法による違いや、接着剤の有無／種類の違い」など木製家具特有の課題に対する技術の蓄積が無いことに加え、「家具」という比較的安価な商品であるが故に技術投資がなされてこなかったため、これまで実用化された例はない。

また本研究を進めるにあたり、木製家具特有の課題である「接合部」に関する考察は行わず、接合は『完全な接合』とみなしてCAE応力解析を行うこととしている。その主な理由は次の3点である。

- ① 接合は、手法の違い（ホゾ・ダボ・その他）やその条件（接着剤の有無や種類、勘合度）によ

\*1 インテリア研究所

り多種多様で、解析条件が複雑化する

- ② あくまで構造の評価（応力分布の可視化や変形度合いの推定）が目的であり、限界を求めることが目的ではない
- ③ 企業への聞き取り調査の結果、接合まで含めた高度な解析よりも、完全な接合とみなした簡易的な解析に対するニーズが高い

## 2 研究, 実験方法

### 2-1 CAE解析ソフトの選定

本研究で得られた成果は、最終的には家具業界への普及を目標としており、企業自身での解析環境の整備、およびその技術の習得を目指している。中小零細企業が多く、設備投資に多額の金額を用意することが困難な家具業界への普及のためには、CAE応力解析のための環境の整備（CAE解析ソフトや3次元CADソフトに関するハードを含めた設備の新規導入、および人材の育成）にかかる費用は、少額であることが求められる。

一方、現在市場には様々なCAE解析ソフトが存在するが、そのほとんどは高額で、家具業界にとっては非現実的な規模の金額である。そのため、家具業界でも導入が可能なCAE解析ソフト（必要な機能を備え、かつ安価で、技術の習得がしやすい）の選定が重要となる。

### 2-2 『仮想木材』を定義(材料特性を適切に設定)

CAE解析には、解析対象物（今回の場合、木製脚物家具）の物質としての特性「材料特性」の数値が必要である。全ての物質は物理的、機械的、強度、熱等に関する様々な材料特性を持っている。その中でCAE応力解析に必要な材料特性は「ヤング率」「ポアソン比」「降伏応力」の3種類である。すなわち木材に関するこれら3種類の数値が必要である。Fusion 360（後述の本研究で使用するCAE解析ソフト）には、様々な物質に関する材料特性が標準ライブラリとして登録されており、CAE解析に使用可能である。しかし木材は、金属や樹脂のように均一な材料と異なり、異方性があるため、ヤング率とポアソン比は力の方向に対する木目の向き（板目／柾目／木口）によって値が異なる上に、非線形特性を有するため降伏応力そのものが存在しない。そのため木材はCAE応力解析に用いることができない（Fusion 360では、異方性材料のCAE応力解析は未サポート）。

そこで本研究では、Fusion 360でCAE応力解析が不可能な木材の代替物質として「材料特性が木材と同等」で、かつ「均一でかつ、降伏応力を有する材料」を『仮想木材』として新たに定義し、その材料特性を適切に設定してCAE応力解析に使用することとした。対象とする樹種は、家具として主に使用されているウォルナット、メイプル、オーク（ナラ）の3樹種とした。

## 3 結果と考察

### 3-1 CAE解析ソフトの選定

CAE解析ソフトに関する調査の結果、必要な機能を有し、中小企業でも導入しやすい価格であり、さらにWeb等での情報提供が多くなされていることから、これから3次元CADやCAEの活用を検討している中小企業でも導入しやすい、オートデスク（株）のFusion 360を選定した。

### 3-2 『仮想木材』を定義(材料特性を適切に設定)

新たに定義する仮想木材（ウォルナット、メイプル、オーク（ナラ））は、「均一な」材料としてその材料特性を設定するため、それぞれの板目と柾目の値の平均値とする（一般に家具の場合、木口を表に配置した木取はされないため、除外した）。さらに不要な端数を丸めた値を、材料特性として設定することとした。

ヤング率とポアソン比は、既存の値が文献等に記されているため、その値を調査し特定する。降伏応力については、非線形特性をもつ木材には降伏応力が存在しないため、「比例限度応力」を降伏応力として代替することとした。比例限度応力は既存の値が無いため、材料試験により測定し特定する（図2）。



図2 仮想木材の材料特性設定工程

#### 3-2-1 文献値調査(ヤング率・ポアソン比)

調査には書籍とWEBを用いた。調査結果を表1に示す。調査の結果、以下のことが判明した。

- 文献により、値に幅がある
- 同一文献内で全ての値を網羅した文献がない

- 文献値は気乾状態（含水率15 %前後）での値で、家具で使用される材は人工乾燥材（含水率一桁）のため、本研究での用途には適さない

そこで本研究においては、ヤング率とポアソン比についても、比例限度応力と同様に材料試験により測定し特定することとし、さらにその試験片には、家具で使用される人工乾燥材を用いることとした。

表1 木材の材料特性に関する文献調査結果

| 出典  | ウォルナット         |              | メイプル       |               | オーク(ナラ)    |                  |                 |
|-----|----------------|--------------|------------|---------------|------------|------------------|-----------------|
|     | ヤング率 [Mpa]     | ポアソン比        | ヤング率 [Mpa] | ポアソン比         | ヤング率 [Mpa] | ポアソン比 (LR/LT/RT) |                 |
| 書籍  | 木材工業ハンドブック(丸善) | 9,500        | -          | 12,000        | -          | 5,300            | 0.33/0.50 /0.64 |
|     | 木材の物理(文永堂出版)   | 7,448~10,290 | -          | 10,388~13,230 | -          | -                | 0.33/0.50 /0.64 |
|     | 木材の知識(経済調査会)   | -            | -          | 10,290        | -          | -                | -               |
|     | 木材の辞典(新倉書店)    | -            | -          | -             | -          | 5,292            | 0.33/0.50 /0.64 |
| WEB | (株)マルホン        | 11,584       | -          | 12,600        | -          | 7,102            | -               |
|     | フェアウッド・パートナーズ  | 11,466       | -          | 12,544        | -          | 11,466           | -               |

### 3-2-2 材料試験(ヤング率・ポアソン比・比例限度応力)

材料試験は、以下の要領で実施した

- 【試験方法】引張試験 (JIS Z2101, 1.0 mm/min)
- 【試験機】(株) 島津製作所製 オートグラフ AG-100kNX
- 【試験片】含水率：8 %  
寸法：長200 mm × 幅20 mm × 厚5 mm  
樹種：ウォルナット, メイプル, オーク (ナラ)  
数量：各12枚 (板目 × 柾目 × n=6)

また図3に示すように試験片の中央に2枚のひずみゲージを直交する配置で貼り付け、試験中の縦と横方向の変位量 (ひずみ) を測定した。

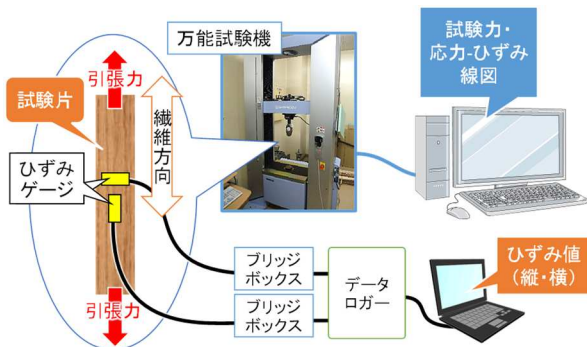


図3 引張試験の概要

この試験により、時系列での引張力 (試験力) [N] および縦と横方向のひずみ [-] が計測できる。さら

に試験片の断面積からその応力 [MPa] が算出され、同時に応力 - ひずみ線図が得られる。以上の結果を用いて、式 (1) よりヤング率を、式 (2) よりポアソン比を算出し、応力 - ひずみ線図より比例域を脱した時点の応力を、比例限度応力として割り出した (図4)。

$$\text{式 (1)} \quad E = (\Delta P \cdot l) / (\Delta l \cdot A)$$

$E$  : ヤング率

$\Delta P$  : 比例域における1分間の荷重増加量

$l$  : ひずみゲージ長

$\Delta l$  :  $\Delta P$ に対応する伸び

$A$  : 試験片断面積

$$\text{式 (2)} \quad \nu = | \Delta \varepsilon_2 / \Delta \varepsilon_1 |$$

$\nu$  : ポアソン比

$\Delta \varepsilon_1$  : 比例域における1分間の縦ひずみ

$\Delta \varepsilon_2$  :  $\Delta \varepsilon_1$ に対応する横ひずみ

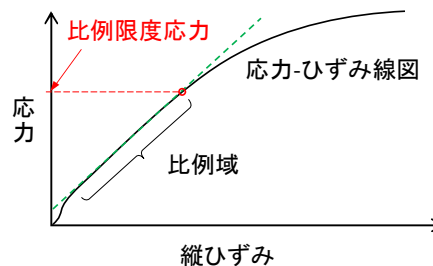


図4 比例限度応力

以上より算出した値から、試験片全12枚 (板目/柾目・混合) の平均値を算出し (表2中のカッコ内の数値)、さらに不要な端数を丸めた値を、CAE応力解析における仮想木材の材料特性の設定値とした (表2)。

表2 仮想木材の材料特性の設定値一覧

| 仮想木材樹種  | 設定値(特定値)             |                    |                       |
|---------|----------------------|--------------------|-----------------------|
|         | ヤング率 [MPa]           | ポアソン比 [-]          | 比例限度応力 [MPa]          |
| ウォルナット  | 12,500<br>(12,513.7) | 0.46<br>(0.462469) | 46.2<br>(46.24815833) |
| メイプル    | 15,800<br>(15,834.8) | 0.44<br>(0.441112) | 53.7<br>(53.69235833) |
| オーク(ナラ) | 9,900<br>(9,911.6)   | 0.42<br>(0.415975) | 51.2<br>(51.49781667) |

### 3-2-3 テスト解析

次に、設定した材料特性の妥当性を確認するため、

簡易的な形状（A・Bの2種類，図5参照）のイスの3次元モデルを製作し，その材料特性に前項で設定した3種類の仮想木材（ウォルナット，メイプル，オーク（ナラ））を定義し，それぞれJIS規格の背もたれの静的強度試験（S1203，区分3，座面に1,300 Nを加えた状態で，背もたれに垂直に560 Nを加える）を想定したCAE応力解析を行った。全ての樹種において，エラー等が生じることもなく，解析が完了した。結果を図5および表3に示す。

まず最大変位量を比較すると，イスの形状A・Bの両タイプにおいて樹種による有意な差が認められた。これはヤング率の設定値が樹種によって大きく異なっていることと表れであると考えられる（ヤング率の値が大きいほど硬い特性を示す）。

これに対し最大応力値の場合，樹種の違いによる有意な差はほとんど見られなかった一方で，イスの形状の差による有意な差が認められた。これは，応力に関しては材料特性よりも解析対象の形状が大きな影響を与えることを示唆している。

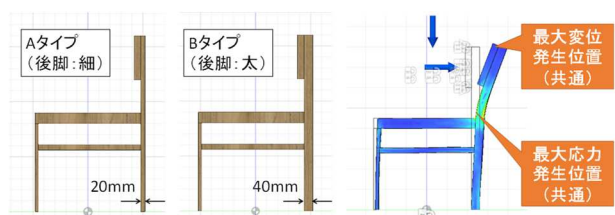


図5 テスト解析概要（形状・結果）

表3 仮想木材によるCAE応力解析結果

| 解析結果    |         | 最大変位量 [mm] |       | 最大応力値 [MPa] |       |
|---------|---------|------------|-------|-------------|-------|
| イス形状タイプ |         | A          | B     | A           | B     |
| 仮想木材樹種  | ウォルナット  | 13.20      |       | 47.76       |       |
|         |         |            | 2.625 |             | 14.57 |
|         | メイプル    | 10.61      |       | 48.02       |       |
|         |         |            | 2.169 |             | 15.00 |
|         | オーク(ナラ) | 17.00      |       | 47.92       |       |
|         |         |            | 3.467 |             | 15.09 |

#### 4 まとめ

本研究では，脚物家具の構造強度を，設計段階である程度の評価が可能になる方法として，CAE応力解析による評価方法を開発する。本稿ではその最初の段階として，本来，異方性を有す上に降伏応力が存在しないためFusion 360ではCAE応力解析が不可能である木材の代替素材として，木材（ウォルナット，メイプル，

オーク（ナラ））と同等の材料特性（降伏応力を比例限度応力で代用）を有した均一な（異方性の無い）材料を『仮想木材』として新たに定義し，CAE応力解析に使用可能であることを確認した。定義にあたり設定した材料特性は引張試験の結果より算出し，その試験片には家具に使用される材と同じ「人工乾燥材」を用いた。

今後は今回設定した材料特性（定義した材料）を用いて，脚物家具を対象としたCAE応力解析を行い，その結果の検証を行う。具体的には次のとおりである。

- A) 協力企業より，木製イスとその図面を入手
- B) 木製イスの図面から3次元モデルを製作
- C) 材料特性として，今回設定した値を設定
- D) JIS規格の強度試験で使用する試験用具（試験床・ストップ・各種当て板）の3次元モデル製作
- E) B及びDで製作した3次元モデルを用い，JIS規格の強度試験をシミュレーション（CAE応力解析）
- F) Aで入手した木製イスで，同じJIS規格の強度試験を実施し，その時の応力を測定
- G) Eの結果とFの結果を比較
- H) 比較の結果，影響のある誤差が認められた場合，材料特性の修正や解析条件（荷重／拘束／接触）の修正を適宜実施し，誤差の解消を目指す